基于可拓云模型的干旱区水资源安全评价——以石河子垦区为例

张志君[1]，陈伏龙[1]，龙爱华[1,2]，何新林[1]，何朝飞[1]
(石河子大学水利建筑工程学院，新疆 石河子 832000；2.中国水利水电科学研究院流域水循环模拟与调控国家重点实验室，北京 100038）

摘 要:干旱区水资源安全状况具有一定典型性和区域特色，资源性缺水的实质导致水资源开发利用过程中出现许多矛盾与问题，针对目前干旱区水资源安全评价指标体系的不全面性、多样性，利用最严格水资源管理制度下的“三条红线”指标体系为框架，结合生态环境，建立了包含 24 个指标的干旱区水资源安全评价指标体系。通过合作博弈理论确定组合权重，建立基于可拓云模型的干旱区水资源安全评价模型，以石河子垦区为研究区，综合评价 2007—2017 年区域水资源安全状况。结果表明：石河子垦区水资源安全状况在时间序列上由不安全向基本安全转变;用水总量子系统在基本安全与不安全等级波动;用水效率子系统和纳污控制子系统经历了不安全—基本安全—安全的转变过程;生态环境子系统经历了不安全—安全—基本安全的转变趋势。

关 键 词 :合作博弈法；可拓云模型；水资源安全评价；石河子垦区

随着全球气候变暖，世界经济格局不断调整，人类对有限的水资源实行高强度的开发利用，引发了一系列水生态环境破坏、水资源短缺、水体污染等水安全问题[1]。干旱区水资源安全具有显著的脆弱性，人工—自然绿洲生态发展、盐渍化、荒漠化的相互影响决定绿洲的稳定性[2]，资源型缺水导致农业用水居高不下[3]，因此，区域水资源开发利用程度的合理性，决定了其发展的潜在空间。石河子垦区为玛纳斯河流域内最大的绿洲平原区，近年来，虽垦区不断进行种植结构的调整，但由于耕地面积不断扩大[4]，农业用水挤占生态用水、地下水超采，可利用水资源减少等问题日益突出[3]，合理的进行区域水资源安全评价，能为人类—自然维持一种和谐的发展模式提供指导。

目前，许多学者对区域水资源安全评价进行了一系列研究，主要方法有模糊综合评价法[5]、集对分析法[6]、物元分析法[7]、TOPSIS 法[8]、云模型[9]、投影寻踪模型[10]等。上述方法得到了广泛应用，模糊综合评价对多因素、多层次复杂问题评判效果较好，但其模糊隶属度函数的确定方法有待进一步研究。集对分析法能较好处理事物的不确定性。物元分析法适用于多因子评价，但其指标不相容问题还没有完全解决。TOPSIS 法适用于多方案进行比选，但其自身条件变化易引起正、负理解变化，缺乏一定的稳定性。云模型可将语言值用于定性数值与定量数值不确定转化问题。投影寻踪模型从高维非线性分析原数据结构特征，但其通常结合遗传算法寻找投影方向，不同遗传算法粒子群收敛速度不同。可拓云理论能够将云模型和物元理论融合[11]，通过 Ex、En、He 构成正态云隶属函数的基本参数，实现评价等级边界随机性和模糊性的度量，同时规避物元理论评估中将事物当做定值的描述[12]，其能处理多指标信息不相容问题，将事物定量与定性问题转化为不确定性问题的新方法[13]。目前该方法应用于大坝渗流安全[14]、施工安全[15]、煤炭资源可持续力[13]等方面评价。评价过程中需要结合权重进行综合等级评价，赋权的合理性也决定评价模型的有效性。

因此，本文采用 AHP 法、熵权法、CRITIC 法分别计算指标权重，通过合作博弈论确定评价指标最终组合权重，利用可拓云模型对 2007—2017 年石河子垦区水资源安全状况趋势进行等级评价，为维持区域可持续发展及提升水资源安全保障提供科学合理的指导。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

石河子垦区[3]地理位置 86°04′40″E，44°18′12″N，垦区由 5 个灌区组成，总面积 6 007 km^2。垦区气候干燥少雨，多年平均降水量 180~270 mm，多年平均潜在蒸发量 1 550.6 mm，属于温带大陆性气候[5]。垦区多年平均地表水引用量 8.65×10^8 m^3，泉水引用量 1.46×10^8 m^3，地下水提取量 4.49×10^8 m^3，人均水资源可利用量 2466.62×10^4 m^3，地表水引用

收稿日期：2019－09－29；修回日期：2019－11－08
基金项目：国家自然科学基金项目(51769029)；国家重点研发计划项目（2017YFC0404301）；石河子大学高层次人才科研启动资金项目（RCZK2018C23）资助
作者简介：张志君（1995－），女，硕士研究生，研究方向为水资源开发与利用方面的研究. E-mail: Zhangzhijun@shzu.edu.cn
通讯作者：陈伏龙. E-mail: cfl103@shzu.edu.cn

率达 46.6%，地下水开发利用率达 79.4%。随着垦区耕地扩张，部分地下水超采区水位下降趋势明显，生态环境问题日益突出，垦区沙漠边缘地带极易出现土壤盐渍化、土壤沙化等现象[4]。

1.2 数据来源

人口、GDP 和工农业增加值等社会经济类数据均来源于 2008—2018 年《新疆生产建设兵团统计年鉴》，水资源总量、地下水开采量、河系引水量等数据来源于 2007—2017 年《第八师石河子市各河系引、蓄、供水量年报》，灌溉面积、渠道长度、节灌面积、灌溉用水量等数据来源于 2007—2017 年《第八师石河子市灌溉年报》，灌溉水综合利用系数、生活用水量、工业、生活废水排放量、污水排放总量、COD 排放量、生态环境用水量等数据来源于 2007—2017 年《第八师石河子市水利综合年报》，其他数据参考相关规划报告及相关文献等。

2 研究方法

可拓云模型水资源安全评价流程为：① 选取反映区域水资源现状的指标，建立区域水资源安全评价指标体系，并确定评价等级划分标准(表 1 和表 2)。② 采用合作博弈法确定 3 种单一赋权法的组合权重。③ 利用可拓云模型确定各等级云特征参数。④ 结合确定的云特征参数及正向云发生器得到单指标确定度矩阵。⑤将单指标确定度矩阵结合组合权重得到准则层、子准则层、目标层综合确定度矩阵。⑥ 确定评价样本等级。

2.1 水资源安全评价指标体系的建立

水资源安全系统是一个复合系统，包含水资源、社会经济、生态环境等方面，建立复合的水资源安全评价指标体系，目的在于寻求能反映水资源各系统协调性、可承载能力的一系列指标，迄今尚未有统一的标准体系反映区域水资源安全状况[16]。目前，有基于人工—自然双重影响因素建立的指标体系，如凌红波等[17]从水资源量、供需、社会经济、生态环境等方面构建的指标体系，反映水资源开发利用安全水平；龚巧灵等[18]从经济、社会、生态、供需几方面反映区域水资源安全利用的时空变化；也有通过水质、水量建立的指标体系，如张凤太等[19]从水质、水量选取 12 个指标表征水资源演变特征。有通过 DPSIR 模型构建指标体系，如汪雁佳等[20]利用 DPSIR 模型对荆南三口地区水资源动态演变趋势进行分析。有通过水资源管理“三条红线”框架建立指标体系，如王应武等[10]以用水总量、用水效率、纳污红线 3 方面分析区域水安全的变化；有通过“资源—途径—效率—能力—环境”5 个层面建立指标体系，如张喆等[21]基于 WPI 模型，从区域自然状况和供需满足程度体现区域水资源安全水平。本文依据指标选取的代表性、系统性、可获性原则[5]，参考相关研究成果[6,10,22-23]，建立了含有 24 个指标的水资源安全评价指标体系（表 1）。

表 1 水资源安全评价指标体系

Tab. 1 Water resources safety evaluation index system

目标层	准则层	子准则层	指标层	指标正负	计算公式	意义
A 石河子垦区水资源安全评价	B_1用水总量	C_1 水资源禀赋	D_1产水模数/(10^4m^3•km^{-2})	+	水资源总量/计算面积	区域水资源总量分布情况
			D_2人均水资源可利用量/m^3	+	水资源可利用量/总人口	水资源对人口的承载关系
			D_3用水总量控制/10^8m^3	-	三条红线用水总量控制值	衡量水资源总量管理控制值
			D_4地下水开采潜力系数	-	地下水实际开采量/地下水可开采量	地下水资源承载能力
		C_2 水资源开发利用程度	D_5地表水开发利用率/%	-	河道外地表水实际供水量/当地天然河川径流总量	河川径流开发利用程度
			D_6地下水开发利用率/%	-	地下水实际开采量/地下水资源总量	地下水开采利用程度
	B_2用水效率	C_3 农业用水水平	D_7节灌率/%	+	节水灌溉工程面积/有效灌溉面积	节水灌溉水平
			D_8灌溉水利用系数	+	田间取水量/取水口取水量	农业供水工程达标程度
			D_9万元农业产值用水量/m^3	-	农业用水量/农业 GDP	农业用水效益
			D_{10}渠道防渗率/%	+	渠道防渗长度/渠道总长度	渠道防渗情况

		D_{11} 农田综合用水定额/(m³•hm⁻²)	-	灌溉用水量/农田实灌面积	农业灌溉用水水平
	C_4 工业用水水平	D_{12}工业用水重复利用率/%	+	工业取水量/（工业取水量与重复利用水量之和）	工业用水水平
		D_{13} 万元工业增加值用水量/m³	-	工业用水量/工业增加值	工业用水效益
	C_5 生活用水水平	D_{14}城镇人均生活用水量/%	+	城镇生活用水量/城镇人口	城镇人均生活用水水平
		D_{15} 农村人均生活用水量/(L•d⁻¹)	+	农村生活用水量/农村人口	农村人均生活用水水平
	C_6 水环境污染状况	D_{16}饮用水水源达标率/%	+	水源地取水水质达标量/水源地取水量	饮用水水源地水质达标情况
		D_{17}人均COD排放量/kg	+	COD排放量/总人口	污染物排放情况
B_3纳污控制	C_7 治理保护水资源	D_{18}废水集中处理率/%	+	污废水集中处理量/污废水排放总量	污废水处理程度
		D_{19}工业废水达标排放率/%	+	工业废水处理达标排放量/工业废水产生量达标	工业废水处理达标程度
		D_{20}生活废水处理率/%	+	生活废水处理达标排放量/生活废水产生量达标	生活废水处理达标程度
B_4生态环境	C_8 生态环境现状	D_{21}植被覆盖率/%	+	植被面积/土地面积	植被覆盖情况
		D_{22}土壤盐渍化比率/%	-	土壤盐渍化面积/总土地面积	区域土壤盐渍化程度
	C_9 保障措施	D_{23}生态环境用水率/%	+	生态环境用水量/总用水量	生态环境用水情况
		D_{24} 水利、环保工程投资占GDP比例/%	+	水利、环保投资/总GDP	水利、环境保护投资保障情况

2.3 评价标准确定

依据区域水资源利用现状及相关水资源安全评价研究[17,24-27]，结合专家意见，将水资源安全评价等级划为Ⅰ~Ⅴ级，对于一些定量指标，参考前人在相似研究区的成果，结合垦区现状利用国家标准对部分评价标准进行调整，如地下水资源开发利用率取50%~60%为基本安全，用水总量控制值利用2016—2030年第八师石河子市用水总量控制计划表数值进行确定，各等级评价标准见表2，各等级评判标准特征见表3。

表2 水资源安全评价标准

Tab. 2 Water resources safety evaluation criteria

评价指标	非常安全	安全	基本安全	不安全	危险
D_1 产水模数/(10⁴m³•km⁻²)	≥70	[55,70)	[40,55)	[25,40）	<25
D_2 人均水资源可利用量/m³	≥5 000	[3 500,5 000)	[2 000,3 500)	[1 000,2 000)	<1 000
D_3 用水总量控制/10⁸m³	<10	[10,12)	[12,14)	[14,16）	≥16
D_4 地下水开采潜力系数	<0.6	[0.6,0.8)	[0.8,1.2)	[1.2,1.4）	≥1.4
D_5 地表水开发利用率/%	<15	[15,30)	[30,45)	[45,60）	≥60
D_6 地下水开发利用率/%	<30	[30,50)	[50,60)	[60,80）	≥80
D_7 节灌率/%	≥70	[40,70)	[15,40)	[5,15)	<5
D_8 灌溉水利用系数	≥70	[60,70)	[50,60)	[40,50)	<40
D_9 万元农业产值用水量/m³	<500	[500,1 000)	[1 000,1 500)	[1 500,2 000）	≥2 000
D_{10} 渠道防渗率/%	≥40	[30,40)	[20,30)	[10,20)	<10
D_{11} 农田综合用水定额/(m³•hm⁻²)	<3750	[3 750,5 250)	[5 250,6 750)	[6 750,8 250）	≥8 250

D_{12} 工业用水重复利用率/%	≥90	[80,90)	[70,80)	[50,70)	<50
D_{13} 万元工业增加值用水量/m^3	<10	[10,30)	[30,90)	[90,200）	≥200
D_{14} 城镇人均生活用水量/($L•d^{-1}$)	≥220	[180,220)	[140,180)	[100,140)	<100
D_{15} 农村人均生活用水量/($L•d^{-1}$)	≥150	[120,150)	[80,120)	[50,80)	<50
D_{16} 饮用水水源达标率/%	≥95	[85,95)	[70,85)	[60,70)	<60
D_{17} 人均 COD 排放量/kg	≥15	[10,15)	[8,10)	[5,8)	<5
D_{18} 废水集中处理率/%	≥90	[80,90)	[70,80)	[60,70)	<60
D_{19} 工业废水达标排放率/%	≥85	[70,85)	[55,70)	[40,55)	<40
D_{20} 生活废水处理率/%	≥90	[80,90)	[70,80)	[60,70)	<60
D_{21} 植被覆盖率/%	≥60	[50,60)	[30,50)	[10,30)	<10
D_{22} 土壤盐渍化比率/%	<1.5	[1.5,5)	[5,12)	[12,15)	≥15
D_{23} 生态环境用水率/%	≥5.5	[4,5.5)	[2.5,4.5)	[1,2.5)	<1
D_{24} 水利、环保工程投资占 GDP 比例/%	≥2.2	[1.7,2.2)	[1.2,1.7)	[0.7,1.2)	<0.7

表 3 水资源安全等级评判标准特征

Tab. 3 Characteristics of water resources safety rating criteria

等级	安全状况	等级状况特征
Ⅰ级	非常安全	水资源与各系统之间协调能力、承载能力强，各项功能良好，基本无水生态危机及水灾害事件
Ⅱ级	安全	水资源与各系统之间协调能力、承载能力良好，各项功能比较正常，水生态危机及水灾害事件较少
Ⅲ级	基本安全	水资源与各系统之间协调能力、承载能力基本正常，各项功能大部分正常，发生部分水生态危机及水灾害事件
Ⅳ级	不安全	水资源与各系统之间协调能力变弱、承载能力遭受较大破坏，水生态危机及水灾害事件增加
Ⅴ级	危险	水资源与各系统之间协调能力、承载能力均遭受严重破坏，水生态危机及水灾害事件发生频率较高

2.4 合作博弈法确定组合权重

（1）AHP 法是一种较为主观的赋权方法，能将复杂问题简单层次化[17]。采用 AHP 法确定指标 j 权重 $w_j^{(1)}$参照文献[17]。

（2）熵权法是一种根据样本数据信息量大小，反映信息重要程度的客观赋权方法[19]。其主要计算步骤如下：① 将指标分成正向型和负向型指标得到标准化矩阵 $R(r_{ij})$[19]；② 确定指标 j 的熵值；③ 确定指标 j 的权重 $w_j^{(2)}$。

（3）CRITIC 法是一种以指标对比度和冲突性为计算基础的客观赋权方法[28]。指标信息含量越大，对比度及冲突性越强。步骤如下：① 利用标准化矩阵 $R(r_{ij})$得到指标 j 的信息量 G_j；② 计算指标 j 的权重 $w_j^{(3)}$。

$$G_j = \delta_j \sum_{i=1}^{n} (1 - r_{ij}) \tag{1}$$

式中，δ_j 为标准差，$\sum_{i=1}^{n}(1-r_{ij})$ 为第 j 列指标与其他指标相关性的冲突性量化。

$$w_j = \frac{G_j}{\sum_{j}^{m} G_j} \tag{2}$$

（4）合作博弈法确定组合权重

合作博弈法是一种为提高组合权重精度，基于多种单一权重，权衡各方面的组合权重计算方法[9]。输入 $d(d=1,2,\cdots,e)$ 种单一权重 $w_j^{(d)}$，输出 e 种组合权重。通过合作博弈法计算样本准则层、子准则层、目标层的组合权重，将 AHP 法、熵权法、CRITIC 法作为合作博弈成员，其对应权重分别为 $w_j^{(1)}$ 、$w_j^{(2)}$ 、$w_j^{(3)}$ 。

计算 $w_j^{(e_d)}$，当 e=3 时：

$$\begin{cases} w_j^{(3_1)} = \dfrac{w_j^{(2)} + w_j^{(3)}}{2}, d = 1 \\ w_j^{(3_2)} = \dfrac{w_j^{(1)} + w_j^{(3)}}{2}, d = 2 \\ w_j^{(3_3)} = \dfrac{w_j^{(1)} + w_j^{(2)}}{2}, d = 3 \end{cases} \tag{3}$$

计算 $w_j^{(d)}$ 与 $w_j^{(e_d)}$ 的相关系数 $L_j^{(d)}$：

$$L_j^{(d)} = \frac{\sum_{j=1}^{n}\left[w_j^{(d)} - \overline{w_j}^{(d)}\right]\left[w_j^{(e_d)} - \overline{w_j}^{(e_d)}\right]}{\left\{\sum_{j=1}^{n}\left[w_j^{(d)} - \overline{w_j}^{(d)}\right]^2\right\}^{1/2}\left\{\sum_{j=1}^{n}\left[w_j^{(e_d)} - \overline{w_j}^{(e_d)}\right]^2\right\}^{1/2}} \tag{4}$$

式中：$\overline{w_j}^{(d)}$ 为 d 种权重的均值，$\overline{w_j}^{(e_d)}$ 为除 $w_j^{(d)}$ 外的 $e-1$ 种的组合权重的均值。

计算组合权重 w_j:

$$w_j = \sum_{j=1}^{n} w_j^{(d)} L_j^{(d)} \tag{5}$$

2.5 基于可拓云的水资源安全评价模型

云模型是李毅德院士于 1995 年提出的，事物由定性到定量的不确定转换，由正向云发生器完成[13]，正态云模型可用 (Ex, En, He) 三元有序数组表示。期望值 Ex 为隶属云的分布中心，熵 En 为评估过程中接受样本随机性和模糊性的不确定性描述，超熵 He 揭示样本数据的离散程度，是对熵的不确定性度量[15]。

可拓云模型是将云模型引入物元分析理论中的耦合模型，可拓学中物元分析将评价事物名称 P、事物名称 C_i、事物特征对应值 X 三元有序组 $R=(P,C,X)$ 形成的基本元，结合云模型具有双重不确定性的性质[13,15]，将云模型中的 (Ex, En, He) 代替 X，即可拓云模型为:

$$R_l = \begin{bmatrix} P & C_1 & X_{1l} \\ & C_2 & X_{2l} \\ & \vdots & \vdots \\ & C_n & X_{nl} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P & C_1 & (Ex_{1l}, En_{1l}, He_{1l}) \\ & C_2 & (Ex_{2l}, En_{2l}, He_{2l}) \\ & \vdots & \vdots \\ & C_n & (Ex_{nl}, En_{nl}, He_{nl}) \end{bmatrix} \tag{6}$$

式中：l 为单指标评价等级个数；R_l 为待评价事物划分等级；C_j 为指标名称；(Ex, En, He) 为指标 C_j 关于 l 等级的正态云隶属度函数。

2. 5. 1 可拓云模型特征参数计算值。设评价对象为集合 $A(x_1, x_2,\cdots, x_m)$，评价标准集合为 $Z_l\,(l=1, 2,\cdots, k)$，根据评价标准集合等级边界确定 Ex_{ij}、En_{ij}，He 取值越大，云滴越厚，He 可根据实际经验调整[13]，本文统一取值为 0.01。

$$Ex_{jl}=(x_{max} + x_{min})/2 \tag{7}$$

$$En_{jl}=(x_{max} - x_{min})/2.335 \tag{8}$$

$$He=s \tag{9}$$

式中：Ex_{jl} 为第 j 个指标，第 l 个等级标准差；En_{jl} 为第 j 个指标，第 l 个等级超熵； x_{max}、x_{min} 分别为对应评价标准集合中，第 l 等级上、下界限的最大值和最小值。

2. 5. 2 单指标隶属度 μ_{jl} 计算。将待评估指标值 x_j 看做一个云滴，带入正向云发生器，产生一个期望为 En_{jl}'、标准差为 He 服从标准正态分布的随机数，为提高评价结果置信度水平，重复 t 次计算 En_{jl}' 再取均值得到 En_{jl}''，本文 t=100，

得单指标隶属度μ_{jl}。

$$\mu_{jl}=\exp\left[-\frac{(x_j-Ex_{jl})^2}{2En_{jl}''^2}\right] \tag{10}$$

通过正向云发生器确定指标j的第l个等级隶属度，得到单指标水资源安全隶属度评判矩阵μ_{jl}:

$$\mu_{jl}=\begin{bmatrix}\mu_{11} & \mu_{12} & \cdots & \mu_{15}\\ \mu_{21} & \mu_{22} & \cdots & \mu_{25}\\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots\\ \mu_{n1} & \mu_{n2} & \cdots & \mu_{n5}\end{bmatrix} \tag{11}$$

2.5.3 评价样本综合隶属度 g_l。通过单指标隶属度μ_{jl}和权重w_j进行模糊转换。

$$g_l=\sum_{j=1}^{n}\mu_{jl}\bullet w_j \tag{12}$$

式中：g_l为样本第l个等级隶属度。

2.5.4 评价样本等级计算。评价指标与某等级综合隶属度越大，隶属于该级可能性越大，依据隶属度最大原则，确定样本等级l。同时采用级别特征值法计算评价样本级别特征值k^*[15]。

$$g_l^*=\max\{g_l\,|\,l=1,2,3,4,5\} \tag{13}$$

$$令\ g_l'=\frac{g_l-\min g_l}{\max g_l-\min g_l} \tag{14}$$

$$k^*=\frac{\sum_{l=1}^{5}lg_l'}{\sum_{l=1}^{5}g_l'} \tag{15}$$

3 结果与分析

3.1 权重计算

通过2007—2017年区域水资源评价指标数据得出，组合权重准则层中，用水总量、用水效率、纳污控制、生态环境所占权重分别为0.276、0.407、0.175、0.142，组合准则层内部权重为wB_1=(0.138, 0.198, 0.170, 0.124, 0.234, 0.136); wB_2= (0.100, 0.125, 0.145, 0.083, 0.118, 0.120, 0.133, 0.090, 0.086); wB_3=(0.209, 0.167, 0.260, 0.211, 0.153,); wB_4=(0.243, 0.258, 0.297, 0.202); 各子准则层组合权重为wC_1=(0.219, 0.314, 0.270, 0.197); wC_2= (0.631, 0.369); wC_3=(0.175,0.219, 0.255, 0.145, 0.206)；wC_4=(0.473, 0.527)；wC_5=(0.510, 0.490)；wC_6=(0.555, 0.445)；wC_7=(0.417, 0.338, 0.245)；wC_8=(0.485, 0.515)；wC_9=(0.595, 0.405)；目标层组合权重为w_j（表3）。从准则层权重所占比例来看，用水总量子系统和用水效率子系统占比例较高，共占68.3%。子准则层中，用水总量子系统中前3位分别为：地表水开发利用率、人均水资源量可利用量、用水总量控制，其所占权重分别为0.234、0.198、0.170；用水效率子系统中前3位分别为：万元农业增加值用水量、万元工业增加值用水量、灌溉水利用系数，其所占权重分别为0.145、0.133、0.125；纳污控制子系统中前3位分别为：废水集中处理率、工业废水达标排放率、饮用水水源达标率，其所占权重分别为0.260、0.211、0.209；生态环境子系统中前3位分别为：生态环境用水率、土壤盐渍化比率、植被覆盖率，其所占权重分别为0.297、0.258、0.243。

表3 石河子垦区水资源安全评价指标目标层权重

Tab.3 Shihezi Reclamation Area Water Resources Safety Evaluation Index Target Layer Weight

指标	D_1	D_2	D_3	D_4	D_5	D_6	D_7	D_8	D_9	D_{10}	D_{11}	D_{12}	D_{13}
AHP法	0.036	0.043	0.034	0.030	0.072	0.072	0.025	0.045	0.071	0.026	0.054	0.070	0.070
熵权法	0.041	0.054	0.045	0.034	0.064	0.033	0.042	0.048	0.061	0.034	0.047	0.045	0.060
CRITIC法	0.036	0.056	0.049	0.034	0.064	0.040	0.040	0.054	0.056	0.034	0.048	0.051	0.048
组合权重	0.038	0.055	0.047	0.034	0.064	0.038	0.041	0.051	0.059	0.034	0.048	0.049	0.054

指标	D_{14}	D_{15}	D_{16}	D_{17}	D_{18}	D_{19}	D_{20}	D_{21}	D_{22}	D_{23}	D_{24}	总计
AHP 法	0.059	0.029	0.046	0.023	0.034	0.021	0.013	0.042	0.021	0.042	0.021	1
熵权法	0.034	0.035	0.035	0.030	0.049	0.040	0.027	0.040	0.032	0.042	0.029	1
CRITIC 法	0.037	0.035	0.038	0.029	0.043	0.035	0.027	0.029	0.042	0.043	0.029	1
组合权重	0.037	0.035	0.037	0.029	0.046	0.037	0.027	0.035	0.037	0.042	0.029	1

3.2 水资源安全评价结果

依据样本单指标各等级隶属度矩阵，结合准则层权重，得石河子垦区水资源准则层、子准则层各等级水资源安全隶属度矩阵，采用最大隶属度原则确定准则层、子准则层水资源安全评价等级（表 4）。

表 4 石河子垦区水资源准则层、子准则层安全评价等级

Tab. 4 Shihezi District Water Resources Criteria Layer, Sub-criteria Layer Safety Evaluation Grade

年份	用水总量-子系统 1			用水效率-子系统 2				纳污控制-子系统 3			生态环境-子系统 4		
	水资源禀赋	水资源开发利用程度	子系统 1	农业用水水平	工业用水水平	生活用水水平	子系统 2	水环境污染状况	治理保护水资源	子系统 3	生态环境现状	保障措施	子系统 4
2007	III	III	III	IV	IV	IV	IV	III	IV	IV	IV	IV	IV
2008	III	IV	III	IV	IV	IV	IV	III	IV	IV	IV	IV	IV
2009	IV	IV	IV	III	IV	IV	IV	III	IV	IV	IV	IV	IV
2010	III	III	III	II	IV	IV	IV	III	IV	III	IV	IV	IV
2011	IV	IV	III	II	IV	III	III	III	III	III	III	I	II
2012	IV	III	III	II	III	III	III	II	III	III	III	I	II
2013	IV	IV	IV	II	III	III	III	II	III	III	III	I	II
2014	IV	IV	IV	II	IV	III	III	II	II	II	III	II	III
2015	IV	IV	III	II	IV	III	II	II	II	II	III	II	III
2016	III	III	III	II	III	III	II	II	II	II	III	I	III
2017	III	III	III	II	III	III	II	II	II	II	III	II	III

3. 2. 1 用水总量—子系统 1 除 2009、2013—2014 年外总体维持在基本安全等级，其中水资源禀赋层与水资源开发利用层位于III~IV级，处于上下波动状态。这是因为 2009 年径流总量为 14.241×10^8 m^{3}较其他年份较少，地表水、地下水开发利用率分别为 53.56%、76.03%，均接近不安全水平。而 2013 年地下水开发利用率为 80.4%，属于不安全状况；用水总量 15.80×10^8 m^3，接近不安全等级；而 2014 年地下水开采潜力系数为 1.54，接近不安全水平；且用水总量为 16.21×10^8 m^3，高于不安全水平阈值，地下水开发利用程度属于多年中最高，水资源可承载能力和抵抗危机能力与其他年分相比较低。

3. 2. 2 用水效率—子系统 2 由 2011 年从不安全等级向基本安全等级转变，于 2015 年转向安全等级，整体向安全水平移动。其中农业用水水平层在 2009 年由IV级向III级，于 2010 年转向II级。工业用水水平在III~IV级间波动，除 2012—2013 年、2016—2017 年属于III级外，其余均属于IV级。生活用水水平层由IV级向III级转变。从农业方面看，垦区自 2008 年进行作物种植结构优化，棉花、粮食等作物种植比例下降，其他经济作物种植比例有所上升，从农业用水的具体指标来看，2007—2017 年，农业用水效率显著提升，如万元农业产值 GDP 用水量从 1723.68 m^{3}降低至 248.8 m^3，亩均灌溉用水量从 7663.8 m^3•hm^{-2}下降至 4661.7 m^3•hm^{-2}，灌溉水利用系数从 0.6 提升至 0.65，这 3 项指标的提升体现了农业用水水平的快速发展。近年来，石河子垦区不断进行产业结构调整，2007 年石河子垦区三产结构比例分别为，29.7%、35.8%、35.4%，农业产值所占比重与较发达地区相比相差距较大，农业用水比重占 96.3%，2017 年石河子垦区三产结构比例分别为 16.4%、40.3%、43.3%，在 11 a 间产业结构发生了转变，一产下降 13.3%，二产、三产相对提升 4.5%、7.9%。同时垦区大力推广农业基础节水灌溉设施，使得垦区农业用水效率在 2013 年就有了显著成效。从工业层面看，2017 年石河子垦区万元工业增加值用水量仅为 36.84 m^3，较 2007 年 170.8 m^{3}有较大的提升，但工业用水重复率较低，造成水资源浪费，工业用水效率整改措施不显著。从生活层面看，生活用水水平层随着垦区生活供水保

障措施不断完善，生活用水效率呈上升趋势。

3.2.3 纳污控制—子系统 3 于 2010 年由不安全向基本安全状态转变，于 2014 年转向安全状态，其中水环境污染层中 2007—2011 年属于基本安全等级，从 2012 年起逐步转向安全等级，而水资源治理保护层于 2011 年由不安全水平转向转向基本安全。因为垦区加强水源地饮用水达标率，控制 COD 等废物排放量，提高工业、生活废污水达标排放率，使得垦区纳污控制管理得到了良好的成效。

3.2.4 生态环境—子系统 4 于 2010 年从不安全等级向安全等级过渡，于 2014 年转变为基本安全等级，其中生态环境现状层于 2011 年由不安全等级转向基本安全，保障措施层于 2011 年由不安全转为非常安全。从具体指标分析，其原因是垦区植被覆盖度由 2007 年的 31.37%提升至 2017 年的 52.13%，土壤盐渍化比率从 2007 年的 14%下降至 9%，保障力度具有较为显著的成效，如水利、环保工程投资占 GDP 比例从 2007 年的 1.78%提升到 2017 年的 8.78%。

依据可拓云模型样本单指标隶属度矩阵，结合组合权重，利用单指标隶属度矩阵得到样本各评判等级综合隶属度，采用最大隶属度原则及级别特征值法，确定 2007—2017 年石河子垦区水资源安全综合隶属度及评价等级（表 5）。

表 5 石河子垦区水资源安全综合隶属度及评价等级

Tab. 5 Comprehensive membership and evaluation level of water resources security in Shihezi District

年份	Ⅰ级	Ⅱ级	Ⅲ级	Ⅳ级	Ⅴ级	样本等级	级别特征值
2007	0.056	0.129	0.212	0.502	0.231	Ⅳ	4.486
2008	0.086	0.120	0.256	0.484	0.101	Ⅳ	3.887
2009	0.088	0.149	0.305	0.440	0.090	Ⅳ	3.621
2010	0.091	0.188	0.324	0.368	0.200	Ⅳ	3.808
2011	0.145	0.187	0.394	0.252	0.066	Ⅲ	2.753
2012	0.155	0.446	0.446	0.126	0.086	Ⅲ	2.579
2013	0.134	0.134	0.460	0.120	0.083	Ⅲ	2.627
2014	0.113	0.225	0.416	0.160	0.086	Ⅲ	2.830
2015	0.117	0.247	0.440	0.128	0.083	Ⅲ	2.698
2016	0.267	0.310	0.278	0.140	0.033	Ⅱ	1.645
2017	0.169	0.234	0.404	0.159	0.089	Ⅲ	2.578

3.2.5 评价方法比较。由目标层结果可知，石河子垦区水资源样本综合评价等级中，2007—2010 年属于不安全等级，2010—2017 年整体偏向于基本安全等级，其中水资源安全等级最高和最低分别为 2016 年（Ⅱ级）、2007 年（Ⅳ级）。

为验证模型的可靠性，将评价结果与模糊集对分析法、模糊综合评价方法、物元分析法评价结果进行对比分析（表 6）。

表 6 不同评价方法比较

Tab. 6 Comparison of different evaluation methods

年份	模糊集对分析法	模糊综合评价法	物元分析法
2007	Ⅳ	Ⅳ	Ⅳ
2008	Ⅳ	Ⅳ	Ⅳ
2009	Ⅳ	Ⅲ	Ⅳ
2010	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ
2011	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ
2012	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ
2013	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ
2014	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ
2015	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ
2016	Ⅱ	Ⅱ	Ⅱ

2017	III	III	II

由表6可见，可拓云模型与模糊集对分析法相比，有10个相同，有1个相差1级；与模糊综合评价法相比，有9个相同，有2个相差1级；与物元分析法相比，有9个相同，有2个相差1级。由此可见，可拓云模型与其他3种评价结果基本相近，表明该模型应用于区域水资源安全评价具有一定可靠性和合理性。

4 讨论与结论

4.1 讨论

干旱区水资源安全水平在人为和自然的双重影响下显现出较强的脆弱性，合理构建区域评价指标体系，科学的确立指标权重及阈值是进行水资源安全评价的有效保障[28]。在区域水资源安全评价已有研究中，多是从人工—自然、水质和水量、DPSIR 模型、水资源管理的“三条红线”、WPI 模型框架建立指标体系。而本文以水资源管理 “三条红线”下的指标为基础，结合生态环境保障因素，建立石河子垦区水资源安全评价指标体系，反映石河子垦区水资源安全水平。构建指标体系时参考前人相关区域研究，从水资源禀赋、水资源开发利用程度、农业、工业、生活、水环境、污水治理、生态、保障措施9个方面，选取能反映区域实际情况的指标。结合相关技术规范，对地区地下水开发利用率等指标阈值进行调整，采用合作博弈论对主、客观权重进行组合赋权。从本文分析结果看，影响区域水资源安全水平的因素为工业用水重复利用率、地下水开采强度、生态环境用水保障，这与王永静[3]、梁二敏[30]等的研究基本一致。因此，为改善区域水资源安全水平，亟需加强工艺改进和设备改进，提高工业用水效益与效率，针对部分地下水超采严重灌区，制定分区限采制度，加强生态环境的治理与保障。同时为保障超采区逐步恢复，应加快退地减水工作的实施力度，强化区域用水总量控制目标。由于本文选取数据为时间尺度，无法反映灌区空间分布尺度上的水资源安全水平，因灌区地下水埋深计量设施及统计数据时长问题无法获取，因此从空间分布上反映石河子垦区灌区水资源安全水平是今后仍需研究的问题。

4.2 结论

（1）用水总量子系统和用水效率子系统占比较高，为68.3%，用水总量子系统整体在基本安全与不安全水平波动，用水效率子系统水资源安全状态由不安全转向安全，纳污控制子系统安全等级变化状况由不安全向安全转变，生态环境子系统安全等级总体由不安全向基本安全转变，资源型缺水是该区域人水和谐发展的限制因素，生态环境治理与保护依旧是今后关注的重点。

（2）在2007—2017年，石河子垦区水资源安全等级在时间序列上整体由不安全水平转向基本安全水平转变，其中水资源安全等级最高和最低分别为2016年和2007年。

Water resources security assessment in Arid Area based on extension cloud model: a case study of Shihezi District

ZHANG Zhi-jun[1]，CHEN Fu-long[1]， LONG Ai-hua[1, 2]，HE Xin-lin[1]，HE Chao-fei[1]

(1. *College of Water Conservancy ＆ Architectural Engineering, Shihezi University, Shihezi* 832000, *Xinjiang, China*; 2. *State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing* 100038, *China*)

Abstract: The water resources security situation in arid areas has certain typical and regional characteristics. The essence of resource shortage causes many contradictions and problems in the process of water resources development and utilization. In view of the current incompleteness and diversity of water resources safety evaluation index system in arid areas, Using the “three red lines” indicator system under the most stringent water resources management system as the framework, combined with the ecological environment, established a water resources safety evaluation index system with 24 indicators, and determined the combined weights through cooperative game theory. The cloud model's water resources safety evaluation model in the arid area is based on the Shihezi District as a research area, and comprehensively evaluates the regional water resources security situation in 2007-2017. The results show that the water resources security status in Shihezi District changes from unsafe to bacsic safe in time series; the total water consumption subsystem fluctuates at basic safe and unsafe levels; the water efficiency subsystem and the pollution control subsystem have experienced the trends of insecurity-basic safety-safety; the ecosystem subsystem has experienced a trend of insecurity -basic safety -safety.

Key words: cooperative game method; extension cloud model; water resources safety evaluation; Shihezi District

参考文献 (references):

[1] 周侃, 樊杰, 王亚飞, 等.干旱半干旱区水资源承载力评价及空间规划指引——以宁夏西海固地区为例[J]. 地理科学, 2019, 39(2): 232-241.[Zhou Kan, Fan Jie, Wang Yafei, et al. Water resources carrying capacity evaluation and spatial planning guidelines in arid and Semi-Arid areas: A case study of Xihaigu area in Ningxia [J]. Scientia Geographica Sinica, 2019, 39(2): 232-241.]

[2] 徐海量, 樊自立, 杨鹏年, 等.塔里木河近期治理评估及对编制流域综合规划的建议[J]. 干旱区研究, 2016, 33(2): 223-229.[Xu Hailiang, Fan Zili, Yang Pengnian, et al. Evaluation on the management of tarim river and advices for the future planning of the Tarim river basin[J]. Arid Zone Research, 2016, 33(2): 223-229.]

[3] 王永静, 闫周府.新疆玛纳斯河流域用水结构演变及其驱动力分析[J]. 干旱区研究, 2017, 34(2): 243-250. [Wang Yongjing, Yan Zhoufu. Evolution and driving forces of water consumption structure in the manas river basin in Xinjiang[J]. Arid Zone Research, 2017, 34(2): 243-250.]

[4] 阿依努·吐逊, 张青青, 徐海量, 等.近57 a玛纳斯河流域土地利用/覆被变化[J]. 干旱区研究, 2019, 36(3): 599-605. [Ayinu Tuxun, Zhang Qingqing, Xu Hailiang, et al. Land use/cover change in the manas river basin in recent 57 Years [J]. Arid Zone Research, 2019, 36(3): 599-605.]

[5] 徐斌, 张艳.干旱区绿洲新疆石河子垦区地下水生态系统安全评价[J]. 环境科学研究, 2018, 31(5): 919-926.[Xu Bin, Zhang Yan. Assessment of groundwater ecosystem security in arid oasis Shihezi reclamation area in Xinjiang[J]. Research of Environmental Sciences, 2018, 31(5): 919-926.]

[6] 沈俊源, 吴凤平, 于倩雯.基于模糊集对分析的最严格水安全综合评价[J]. 水资源与水工程学报, 2016, 27(2): 92-97.[Shen Junyuan, Wu Fengping, Yu Qianwen. Strictest comprehensive evaluation of water safety based on fuzzy set pair analysis[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2016, 27(2): 92-97.]

[7] 刘传旺, 吴建平, 任胜伟, 等.基于层次分析法与物元分析法的水安全评价[J]. 水资源保护, 2015, 31(3): 27-32.[Liu Chuanwang, Wu Jianping, Ren Shengwei, et al. Water safety assessment based on ana lytic hierarchy proec ss and matter element analysis method [J]. Water Resources Protection, 2015, 31(3): 27-32.]

[8] 余灏哲, 韩美.基于模糊物元模型的山东省水资源安全TOPSIS评价[J]. 安全与环境工程, 2015, 22(6): 1-6.[Yu Haozhe, Han Mei. Topsis evaluation of water resource security in Shandong province based on fuzzy matter-element model[J]. Safety and Environmental Engineering, 2015, 22(6): 1-6.]

[9] 孙雅茹, 董增川, 徐瑶, 等.基于云模型的城市水安全评价[J]. 人民黄河, 2019, 41(8): 1-6.[Sun Yaru, Dong Zengchuan, Xu Yao, et al. Urban water security evaluation based on cloud model[J]. Yellow River, 2019, 41(8): 1-6.]

[10] 王应武, 陈栋格.基于磷虾觅食算法-最大熵投影寻踪模型的区域水安全评价[J]. 水资源与水工程学报, 2017, 28(5): 80-86.[Wang Yingwu, Chen Dongge. Regional water security evaluation based on krill herd algorithm-maximum entropy projection pursuit model[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2017, 28(5): 80-86.]

[11] 胡涛, 王树宗, 杨建军.基于云模型的物元综合评估方法[J]. 海军工程大学学报, 2006, 18(1): 85-88.[Hu Tao, Wang Shuzong, Yang Jianjun. Matter-element integration evaluation method based on cloud model[J]. Journal of Naval University of Engineering, 2006, 18(1): 85-88.)

[12] 曲朝阳, 王健, 吴云, 等.基于可拓云模型的电力生产安全综合评估方法[J]. 安全与环境工程, 2015, 22(3): 94-98.[Qu Zhaoyang, Wang Jian, Wu Yun, et al. Synthetic evaluation method for electric power production safety based on the extension cloud model[J]. Safety and Environmental Engineering, 2015, 22(3): 94-98.]

[13] 薛黎明, 刘保康, 郑志学, 等.基于理想点—可拓云模型的煤炭资源可持续力评价[J]. 自然资源学报, 2018, 33(9): 1657-1665.[Xue Liming, Liu Baokang, Zheng Zhixue, et al. Evaluation of sustainable capacity of coal resources based on extension cloud theory and ideal point method[J]. Journal of Natural Resources, 2018, 33(9): 1657-1665.]

[14] 王晓玲, 戴林瀚, 吕鹏, 等.基于DSR−可拓云的渗流安全综合评价研究[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2019, 52(1): 52-61.[Wang Xiaoling, Dai Linhan, Lyu Peng, et al. Study on comprehensive evaluation model of seepage safety

based on DSR-extension cloud[J]. Journal of Tianjin University, 2019, 52(1): 52-61.]
[15] 刘玲, 陈娟娟, 徐代忠.基于可拓云理论的施工安全综合评价[J]. 土木工程与管理学报, 2017, 34(3): 39-44.[Liu Ling, Chen Juanjuan, Xu Daizhong. Construction safety comprehensive assessment model based on the extension cloud model[J]. Journal of Civil Engineering and Management, 2017, 34(3): 39-44.]
[16] 李智飞, 门宝辉, 张士锋, 等.河西走廊地区狭义/广义水资源脆弱性对比研究[J]. 干旱区地理, 2014, 37(5): 939-947.[Li Zhifei, Men Baohui, Zhang Shifeng, et al. A comparative study of narrow/general water resources vulnerability in Hexi Corridor region[J]. Arid Land Geography, 2014, 37(5): 939-947.]
[17] 凌红波, 徐海量, 乔木, 等.基于AHP和模糊综合评判的玛纳斯河流域水资源安全评价[J]. 中国沙漠, 2010, 30(4): 989-994.[Ling Hongbo, Xu Hailiang, Qiao Mu, et al. Appraisement of water resource security in manasi river basin by analytic hierarchy process and fuzzy comprehensive evaluation[J]. Journal of Desert Research, 2010, 30(4): 989-994.]
[18] 龚巧灵, 官冬杰.基于BP神经网络的三峡库区重庆段水资源安全评价[J]. 水土保持研究, 2017, 24(6): 292-299.[Gong Qiaoling, Guan Dongjie, et al. Study on water resources security evaluation of Chongqing section of three gorges reservoir based on BP neural network [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2017, 24(6): 292-299.]
[19] 张凤太, 张军以, 苏维词. 基于熵权和主成分分析的岩溶区水资源安全评价——以毕节为例[J]. 环境工程, 2016, 34(3): 174-179.[Zhang Fengtai, Zhang Junyi, SU Weici. Assessment of water resource security based on entropy weight method and principal component analysis in karst areas: study of Bijie city[J]. Environmental Engineering, 2016, 34(3): 174-179.]
[20] 汪雁佳, 李景保.三峡水库运行后荆南三口地区水资源安全状态及归因分析[J]. 自然资源学报, 2018, 33(11): 1992-2005.[Wang Yanjia, Li Jingbao. Water resources security status alteration and its attribution analysis in the three outlets of southern Jingjiang river after the operation of the three gorges reservoir[J]. Journal of Natural Resources, 2018, 33(11): 1992-2005.]
[21] 张喆, 何太蓉, 舒瑞琴, 等.基于WPI模型的重庆市水资源安全分析[J]. 长江科学院院报, 2016, 33(4): 1-5, 15.[Zhang Zhe, He Tairong, Shu Ruiqin,et al. Analysis of water resources security in Chongqing city based on WPI model [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2016, 33(4): 1-5, 15.]
[22] 左其亭, 胡德胜, 窦明, 等.基于人水和谐理念的最严格水资源管理制度研究框架及核心体系[J]. 资源科学, 2014, 36(5): 906-912.[Zuo Qiting, Hu Desheng, Dou Ming, et al. Framework and core system of the most stringent water resource management system based on the concept of Human-water harmony[J]. Resources Science, 2014, 36(5): 906-912.]
[23] 杨丹, 张昊, 管西柯, 等.区域最严格水资源管理“三条红线”评价指标体系的构建[J]. 水电能源科学, 2013, 31(12): 182-185.[Yang Dan, Zhang Hao, Guan Xike, et al. Establishment of evaluation indicator system of "three red lines" for the most strict regional water resources management[J]. Water Resources and Power, 2013, 31(12): 182-185.]
[24] 张晓, 董宏志. 吐鲁番盆地平原区地下水潜力评价[J]. 地下水, 2017, 39(2): 18-20, 26.[Zhang Xiao, Dong Hongzhi. Evaluation of groundwater potential in plain area of Turpan basin[J]. Underground Water, 2017, 39(2): 18-20, 26.]
[25] 李艳丽, 苏维词, 杨吉. 基于熵权模糊综合模型的重庆市水环境安全评价[J]. 人民长江, 2017, 48(9): 25-29.[Li Yanli, SU Weici, Yang Ji. Assessment of water environment security in Chongqing using fussy evaluation model based on entropy weight method[J]. Yangtze River, 2017, 48(9): 25-29.]
[26] 宋培争, 汪嘉杨, 刘伟, 等.基于 PSO 优化逻辑斯蒂曲线的水资源安全评价模型[J]. 自然资源学报, 2016, 31(5): 886-893.[Song Peizheng, Wang Jiayang, Liu Wei, et al. Water resources security evaluation model based on PSO optimized logistic curve[J]. Journal of Natural Resources, 2016, 31(5): 886-893.]
[27] 潘争伟, 金菊良, 吴开亚, 等.巢湖流域水安全评价的集对分析模型[J]. 水资源保护, 2012, 28(3): 9-15.[Pan Zhengwei, Jin Juliang, Wu Kaiya, et al. Set pair analysis model for water safety evaluation of Chaohu watershed[J]. Water Resources Protection, 2012, 28(3): 9-15.]
[28] 刘东, 徐磊, 朱伟峰.基于最优组合赋权和改进TOPSIS模型的区域农业水资源恢复力评价[J]. 东北农业大学学报, 2019, 50(6): 86-96.[Liu Dong, Xu Lei, Zhu Weifeng. Evaluation of regional agricultural water resource resilience based on optimal combination determining weight method and improved TOPSIS model[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2019, 50(6): 86-96.]

[29] 张沛, 徐海量, 杜清, 等.基于RS和GIS的塔里木河干流生态环境状况评价[J]. 干旱区研究, 2017, 34(2): 416-422. [Zhang Pei, Xu Hailiang, Du Qing. Change of ecological conditions in the mainstream area of the tarim river based on RS and GIS [J]. Arid Zone Research, 2017, 34(2): 416-422.]

[30] 梁二敏, 张军民, 杨卫红.新疆玛纳斯河流域绿洲景观生态脆弱性时空分异[J]. 干旱区研究, 2017, 34(4): 950-957. [Liang Er min, Zhang Junmin, Yang Weihong. Spatiotemporal variation of landscape ecological vulnerability in oasis in the manas river basin, Xinjiang[J]. Arid zone research, 2017, 34(4): 950-957.]